

MANNAROBITO: ESTUDO DE CONTROLE E MOVIMENTO PARA UM ROBÔ BÍPEDE ARTICULADO

Amanda dos Santos Lunardello (PIBIC/CNPq/FA/Uem), Rodrigo Calvo (Orientador),
Linnyer Ruiz Aylon (Orientadora). E-mail: ra135051@uem.br.

Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Maringá, PR.

Engenharia, Engenharia Mecânica/ Processos de Fabricação/ Robotização.

Palavras-chave: cinemática direta; controle PID; marcha humana.

RESUMO

A locomoção bípede representa um desafio central na robótica, exigindo sistemas de controle robustos para garantir a estabilidade. O principal obstáculo é manter o equilíbrio dinâmico durante a marcha, especialmente sob a ação de perturbações externas. Este trabalho teve como objetivo desenvolver e analisar, por meio de simulação computacional, um modelo de controle para os membros inferiores de um robô bípede. A metodologia integrou um padrão de marcha gerado por funções matemáticas, baseado na cinemática direta, com um sistema de controle de equilíbrio ativo utilizando um controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) e a estratégia de tornozelo. Os resultados da simulação, validados por uma perturbação externa, demonstraram que o controlador foi eficaz em manter a estabilidade, mantendo o centro de massa do robô dentro da base de suporte. Isso confirma que a abordagem proposta é uma solução viável para o controle de marcha bípede.

INTRODUÇÃO

A robótica moderna exerce um impacto significativo em setores essenciais como saúde, indústria e exploração de ambientes hostis. Dentre as diversas morfologias robóticas, o robô bípede destaca-se pela sua semelhança com a locomoção humana, que lhe confere a capacidade única de navegar em terrenos complexos e interagir de forma natural com ambientes projetados para humanos (SICILIANO; KHATIB, 2016). Apesar dessa versatilidade, a locomoção bípede enfrenta como desafio fundamental a sua instabilidade intrínseca. Operando sob o princípio do pêndulo invertido Linear (LIPM), um robô bípede exige um controle ativo e contínuo para manter o equilíbrio durante a caminhada (OGATA, 2010). O desafio, portanto, não está apenas na geração do movimento, mas garantir a estabilidade dinâmica, especialmente ao lidar com variações inesperadas, como uma perturbação externa. Neste contexto, o objetivo deste trabalho é realizar um estudo de controle e movimento para um robô bípede articulado, com foco nos membros inferiores, responsáveis pela marcha e estabilidade. Para isso, foi desenvolvido um modelo em ambiente de simulação computacional que integra os modelos de cinemática direta para a geração de um movimento natural e um sistema de controle PID, baseado no Modelo de Pêndulo Invertido, para garantir a estabilidade dinâmica. Este documento

está estruturado da seguinte forma: a Seção 2 detalha os materiais e métodos, incluindo o equacionamento da cinemática e do controle. A Seção 3 apresenta e discute os resultados obtidos da simulação. Finalmente, a Seção 4 apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia foi baseada em simulação computacional em Python 3, no ambiente Google Colaboratory, utilizando as bibliotecas NumPy, Pandas e Matplotlib.

O modelo do robô consiste em um sistema articulado focado nos membros inferiores, composto por um tronco, quadris e duas pernas com juntas no joelho e tornozelo, cujos parâmetros dimensionais foram baseados em um desenho esquemático inicial. O sistema de coordenadas foi definido com o eixo Y representando a direção lateral, X a direção frontal e Z a altura. A geração da marcha foi implementada através de funções matemáticas cíclicas que definem os ângulos das juntas em função do tempo (CRAIG, 2005), permitindo um movimento suave sem a necessidade de planejamento de trajetória complexo. Os ângulos do quadril (θ_1) e do joelho (θ_2) foram definidos por (1) e (2).

$$\theta_1(t) = A_{quadril} \cdot \cos(\omega t) \quad (1)$$

$$\theta_2(t) = (A_{balanc} \cdot \max(0, \sin(\omega t))) + (A_{apoio} \cdot \max(0, -\cos(\omega t))) \quad (2)$$

Com os ângulos articulares definidos, as coordenadas cartesianas de cada junta são calculadas a cada instante através da cinemática direta.

A estratégia de controle de equilíbrio foi baseada no Modelo de LIPM, uma simplificação eficaz na robótica bípede (KAJITA *et al.*, 2003), onde a massa superior do robô é tratada como um ponto a ser equilibrado sobre a perna de apoio. Para implementar o controle, foi utilizado um controlador PID, uma ferramenta robusta para sistemas de malha fechada (OGATA, 2010), que calcula uma ação corretiva baseada no erro de inclinação lateral do tronco. A saída do controlador é aplicada como uma rotação no tornozelo da perna de apoio, uma técnica conhecida como Estratégia de Tornozelo. Esta ação desloca o Centro de Pressão (CoP) sob o pé, gerando um momento no solo que se opõe ao tombamento e mantém o Ponto de Momento Zero (ZMP) dentro da base de suporte, uma condição necessária para a estabilidade dinâmica (SICILIANO; KHATIB, 2016).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos dados extraídos da simulação permitiu validar tanto a cinemática da marcha quanto a eficácia do sistema de controle de equilíbrio. A qualidade da marcha gerada foi avaliada primeiramente através da análise da trajetória do pé. Como observado na Figura 1(A), a trajetória do pé direito no plano sagital exibe um movimento cíclico em forma de arco. O pé começa no chão, levanta-se a uma altura máxima de aproximadamente 10 cm para passar pela fase de balanço sem arrastar, e depois desce para tocar o chão novamente mais à frente. Estes dados validam que o modelo cinemático gera uma marcha funcional, e a consistência do comprimento da passada e da altura máxima ao longo dos ciclos indica um movimento estável e

repetitivo. Complementarmente, a análise dos ângulos articulares na Figura 1 (B) revela uma relação de fase coordenada entre o quadril e o joelho. Quando o ângulo do quadril é positivo (perna à frente), o ângulo do joelho atinge seu valor máximo (cerca de 70 graus), indicando a flexão para levantar o pé. Quando o ângulo do quadril é negativo (perna de apoio), o ângulo do joelho é pequeno, mas não nulo, mantendo a perna quase esticada para suportar o peso. Este padrão, que se repete a cada ciclo, demonstra a implementação de uma marcha biomecânica coerente. A robustez do sistema de controle foi o ponto central da análise, validada através da aplicação de uma perturbação lateral em $t=4.0s$. A Figura 1(C) demonstra a resposta do sistema. Antes da perturbação, o erro de inclinação oscila, e o controle PID realiza correções. No instante da perturbação, o erro sofre um pico, ao qual o sinal de controle PID responde imediatamente com um vale, aplicando uma forte correção no tornozelo. Como resultado, a posição lateral do tronco, retorna suavemente à sua oscilação normal, provando a capacidade de recuperação. A prova definitiva da estabilidade é fornecida na Figura 1(D), que se baseia no conceito de Base de Suporte. A regra fundamental para um bípede não cair é que a projeção do seu Centro de Massa (CoM) permaneça dentro da sua base de suporte. Analisando os dados, observa-se que em todos os momentos, o valor da posição do tronco (que aproxima o CoM) está sempre entre os limites mínimo e máximo da base de suporte. Mesmo durante o a perturbação, o controlador consegue manter o CoM dentro dessa zona segura, validando o modelo como um todo.

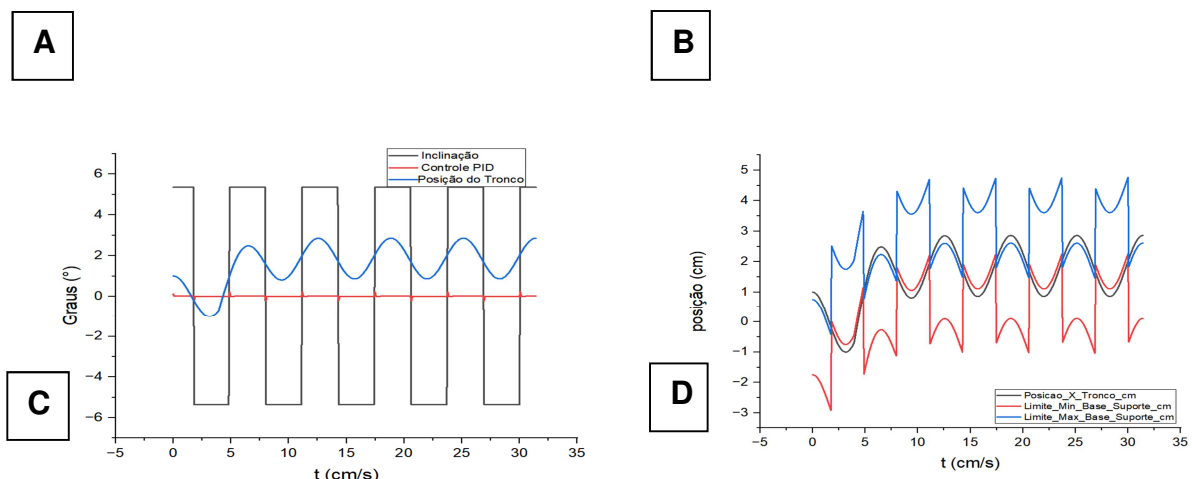


Figura 1 - Análise da simulação- (A) Trajetória do pé direito no plano sagital; (B) Variação dos ângulos do quadril e do joelho; (C) Resposta do sistema à perturbação; (D) Análise da estabilidade dinâmica.

CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou o desenvolvimento e a análise de um modelo de simulação para um robô bípede, demonstrando que a combinação de um padrão de marcha pré-definido com um controlador de equilíbrio PID ativo é uma abordagem eficaz para gerar uma locomoção estável. Os resultados confirmaram que o sistema foi capaz não apenas de andar de forma coordenada, mas também de se recuperar de uma perturbação externa significativa, atendendo plenamente aos objetivos propostos. Os dados cinemáticos validaram a naturalidade do movimento, enquanto a análise da resposta à perturbação comprovou a robustez do controle de equilíbrio. Apesar dos resultados promissores em um ambiente idealizado, reconhece-se a necessidade de validações futuras. Como sugestões para a continuação deste trabalho, destacam-se a implementação do algoritmo em um protótipo físico para testes no mundo real, a expansão do modelo para lidar com terrenos não planos e a integração de um sistema de cinemática inversa para permitir o planejamento de trajetórias mais complexas e adaptativas.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Ecosistema Manna Team pelo apoio e colaboração durante o desenvolvimento deste projeto. Também manifestamos nossa gratidão à Fundação Araucária para o Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Estado do Paraná (F.A.) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) do Brasil pelo suporte nesta pesquisa.

REFERÊNCIAS

CRAIG, J. J. **Introduction to Robotics: Mechanics and Control**. 3. ed. Pearson Prentice Hall, 2005.

KAJITA, S. et al. **Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point**. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION, Taipei, 2003. Anais... IEEE, 2003. p. 1630-1636.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

SICILIANO, B.; KHATIB, O. (org.). **Springer handbook of robotics**. Springer, 2016.